Sonderdruck aus

Verhandlungen Gesellschaft für Ökologie Band XVI Gießen 1986

Im Auftrag der Gesellschaft
herausgegeben
von Lore Steubing

Göttingen 1987

Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie (Gießen 1986) Band XVI 1987

Ökologische Bedeutung und bioindikatives Potential der Bodenprotozoen

Wilhelm Foissner

Synopsis

Recent investigations show that two thirds of the animal respiration of the soil is due to the protozoa, although their contribution to the animal standing crop biomass is 'only' about 30%. Protozoa respire about 10% of the total carbon input, and their production is in the same order of magnitude as that of the earthworms. The considerable contribution of the protozoa to the energy flux in the soil, their high reproductive rate, their eukaryotic genome, their wide and often cosmopolitic distribution, and their relative invagility suggests a high bioindicative potential of this group. Some examples are discussed. There is a strong positive correlation between the numbers of species and individuals of soil protozoa and the humus content of the soil. Soil compaction and pesticides drastically reduce the abundances of the ciliates and testate amoebae. Organic fertilizers and ecofarming increase the abundances and biomasses of these taxa more than mineral fertilizers and conventional farming. The contribution of the soil protozoa to the animal biomass, respiration, and production as well as their aptitude as bioindicators represent a challenge for community ecologists and legislators to consider these minute but important organisms more than before.

Bioindication, ecofarming, fertilizers, humus, pesticides, production, respiration, soil compaction, soil protozoa, standing crop.

1. Einführung

Die Protozoen werden von den Bodenzoologen meist wenig beachtet. Auf Kongressen und Tagungen hat man oft den Eindruck, daß es im Boden nur Regenwürmer gibt, obwohl seit 20 Jahren nicht wegzudiskutierende Daten existieren, die auf eine bedeutende Rolle der Protozoen im Energiehaushalt des Bodens hinweisen (STOUT, HEAL 1967). Dies legt nahe, sie auch zur Bioindikation zu nutzen. Im vorliegenden Beitrag wird versucht, die neuesten Ergebnisse zu dieser Thematik in knapper, allgemein verständlicher Form zusammenzufassen. Eine ausführlichere Darstellung mit Berücksichtigung der älteren Literatur findet sich bei FOISSNER (1987a).

2. Ökologische Bedeutung der Bodenprotozoen

Die Bedeutung einer Tiergruppe in einem Ökosystem kann man am besten mit den Begriffen 'standing crop', 'Respiration' und 'Produktion' beschreiben. Die standing crop ist die zu einem beliebigen Zeitpunkt vorhandene Biomasse; etwa 30% der tierischen standing crop im Boden wird von den Protozoen gestellt (Abb. 1). Die Respiration ist ein Maß für die Stoffwechselaktivität; es ist jener Teil der aufgenommenen Nahrung, der als Energiespender zur Aufrechterhaltung der Lebensprozesse dient. Die Atmungsintensität der Protozoen ist bezogen auf Gewichtseinheiten vergleichsweise groß, weshalb rund 70% der tierischen Respiration im Boden von den Protozoen geleistet werden (Abb. 1). Man schätzt, daß die Protozoen etwa 10% des totalen Kohlenstoffeintrages veratmen (FOISSNER 1987a, MEISTERFELD 1986). Hinsichtlich der Produktion, das ist die in einer bestimmten Zeiteinheit neu geschaffene Biomasse, zeigen die Untersuchungen meiner und anderer Arbeitsgruppen, daß allein die Testaceen (beschalte Amöben) so viel produzieren wie die Regenwürmer, nämlich zwischen 30 und 250 g Frischmasse pro m^2 und Jahr (FOISSNER 1987a). Es ist also festzuhalten, daß der Anteil der Protozoen am Energieumsatz des Bodens etwa jenem der 'Würmer' entspricht - und deren große Bedeutung wird ja allgemein anerkannt. Eine grobe Distinktion darf nicht unerwähnt bleiben: In den extremen Regionen der Erde, wie den Gebirgen und den Polargebieten, werden weit über 50% des Energieumsatzes von den Protozoen geleistet, während es in den regenwurmreichen Böden der gemäßigten Zonen wohl eher um 10-30% sind. Leider liegen gerade aus diesem Gebiet, besonders von unseren Acker- und Grünlandböden, kaum Untersuchungen vor; ein bedauernswertes Forschungsdefizit, das umso schwerer wiegt, als nun vertrauenswürdige Befunde vorliegen, daß die Protozoen - via 'Bakterien grazing' - die Stickstoffaufnahme der Pflanzen stark steigern (CLARHOLM 1985).

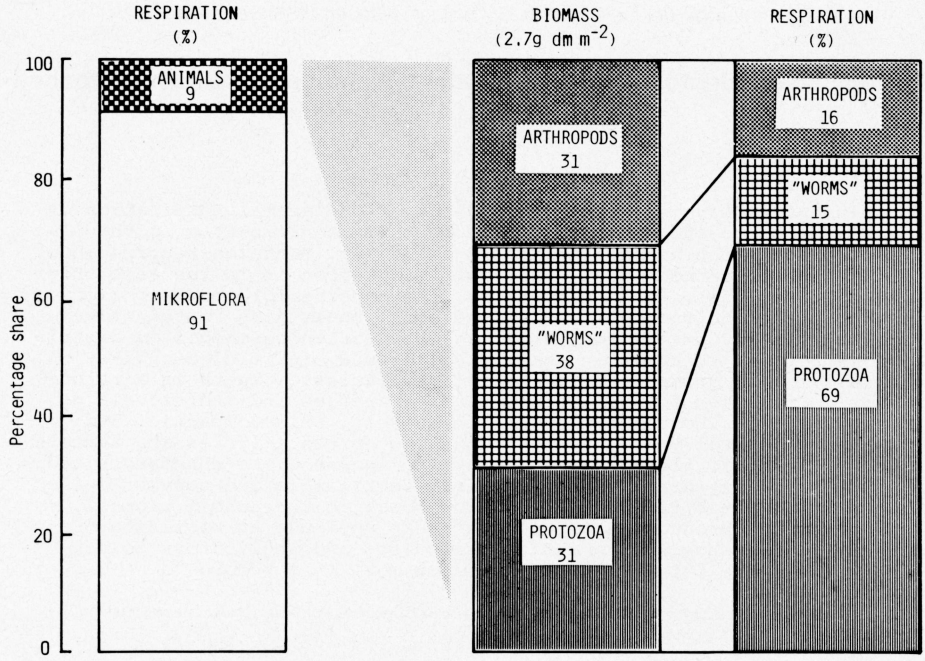

Abb. 1: Biomasse und Respiration der Bodenorganismen.
Die Graphik zeigt die Mittelwerte von 14 Ökosystemstudien von verschiedenen Standorten der Welt. 'Würmer': Nematoden, Rotatorien, Enchytraeiden, Lumbriciden; dm = Trockenmasse. Aus FOISSNER (1987a).

Neuerdings wird auch die Möglichkeit des Einsatzes von Bodenprotozoen zur biologischen Schädlingsbekämpfung, besonders zur Kontrolle fungaler Infekte, wieder diskutiert (FOISSNER 1987a, PETZ et al. 1986).

3. Bioindikatives Potential der Bodenprotozoen

Untersuchungen über die Auswirkungen natürlicher und anthropogener Einflüsse auf die Abundanz und das Artenspektrum der Bodenprotozoen sind seit langem bekannt (FOISSNER 1987a). Mit dem Begriff der Bioindikation werden die Bodenprotozoen aber erst seit kurzem verbunden (FOISSNER et al. 1982). Dieser Forschungsansatz basiert auf folgenden Erkenntnissen:

I. Die Protozoen sind wegen ihrer hohen standing crop und Produktion eine wichtige Komponente im Ökosystem Boden. Veränderungen ihrer Gemeinschaftsstruktur und Dynamik können nicht als nebensächlich eingestuft werden, weil sie Änderungen in der Geschwindigkeit und der Art der Bodenbildung bewirken.

II. Wegen ihres großen reproduktiven Potentials können die Protozoen rascher als alle anderen eukaryontischen Organismen auf Umwelteinflüsse reagieren. Sie sind daher auch für die Kurzzeitindikation geeignet. Dies ist aus den Fließgewässern, in denen Protozoen seit langem als Bioindikatoren eingesetzt werden, gut bekannt (SLÁDEČEK 1973).

III. Die Struktur des eukaryontischen Genoms der Protozoen ähnelt dem der Metazoen (RAIKOV 1982). Im Gegensatz zu den Prokaryonten können die Ergebnisse daher eher verallgemeinert und auf höhere Organismen übertragen werden.

IV. Protozoen sind auch bzw. gerade dort reichlich vorhanden, wo viele andere Tiergruppen auf Grund extremer Lebensbedingungen ganz oder teilweise ausfallen, zum Beispiel oberhalb der Waldgrenze und in der Antarktis (FOISSNER 1985).

V. Protozoen sind standortstreu, und viele (aber nicht alle!) Arten sind kosmopolitisch verbreitet. Da Verlagerungen praktisch nur in der Vertikalen stattfinden, entfällt das bei anderen Tiergruppen, besonders beim Epigäon,

oft schwierig zu bewältigende Problem der horizontalen Migration. Die kosmopolitische Verbreitung vieler Arten ermöglicht unter anderem einen leichteren Vergleich von Ergebnissen. Es existieren jedoch viele ökologische Rassen (BUITKAMP 1979).

Die folgenden Beispiele berücksichtigen vor allem praxisrelevante, neuere Arbeiten.

3.1 Korrelation zwischen Arten- und Individuenzahl der Protozoen und dem Humusgehalt des Bodens

Die entscheidende Bedeutung des Humus für die Bodentiere ist unbestritten. Die in Tab. 1 zusammengefaßten Daten aus mehreren Untersuchungsgebieten (FOISSNER 1987a) zeigen, daß dies auch für die Protozoen zutrifft. Daß sich bei der Abundanz der Ciliaten keine deutliche positive Korrelation nachweisen läßt, mag auf methodische Schwierigkeiten (Kulturmethoden) und/oder auf das Phänomenon der Ciliatostasis zurückzuführen sein, die in evolvierten Böden die Abundanz der aktiven Ciliaten stark unterdrückt (FOISSNER 1987a, LÜFTENEGGER et al. 1986b).

Tab. 1: Spearmansche Rangkorrelationskoeffizienten (R) zwischen der Arten- und Individuenzahl der Testaceen und Ciliaten und dem Humusgehalt des Bodens.
Nach FOISSNER (1987a).

	R	
	Artenzahl	Individuenzahl
Testaceen	+0.9082 S	+0.7452 S
Ciliaten	+0.7045 S	+0.2008 NS
Anzahl der untersuchten Habitate	25	40

S = signifikant (P < 0.05), NS = nicht signifikant (P > 0.1)

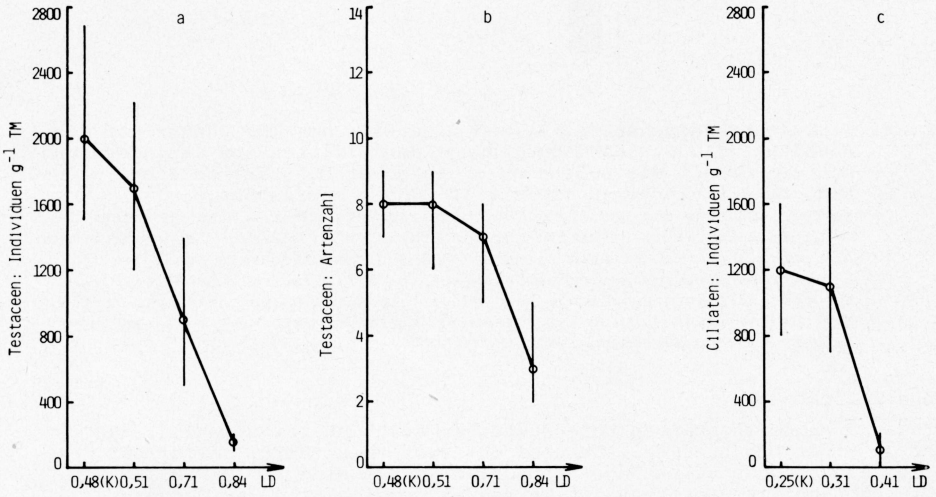

Abb. 2a-c: Wirkung der Bodenverdichtung auf Testaceen und Ciliaten.
a,b: Freiland-Experiment mit dem humusreichen Mineralbodenhorizont (0-5 cm) einer alpinen Almweide in 2000 m Meereshöhe. Methode: randomisiertes Block-Design, n = 3; Verdichtungskammern mit 500 cm^3; Dauer der Verdichtung: 12 Wochen; Direktzählung der Testaceen in wässriger Bodensuspension. Nach BERGER et al. (1985).
c: Laborexperiment mit dem Humushorizont eines Mischwaldes (*Quercus, Carpinus, Pinus*). Methode: 3 Wiederholungen; Verdichtungskammern mit 4 g Humus; Dauer der Verdichtung: 9 Wochen; Direktzählung der Ciliaten und "most probable number" Methode. Nach COÛTEAUX (1985a). K = Kontrolle (unverdichteter Boden), LD = Lagerungsdichte (kg/dm^3), TM = Trockenmasse des Bodens.

3.2 Bodenverdichtung

Die Bodenverdichtung macht sich vor allem in der industrialisierten Landwirtschaft zunehmend unangenehm bemerkbar. Freiland- und Laborexperimente (BERGER et al. 1985, COÛTEAUX 1985a, b) zeigen übereinstimmend eine verdichtungsabhängige Abnahme der Abundanz und Artenzahl der Protozoen (Abb. 2a-c). Der Rückgang der Abundanz wird vor allem durch eine Verlängerung der Generationszeit verursacht (COÛTEAUX 1985b). Große Arten werden stärker unterdrückt als kleine, seltenere sind nach starker Kompression nicht mehr nachweisbar. Daher kommt es zu deutlichen Verschiebungen in den Dominanzstrukturen der Taxozönosen (BERGER et al. 1985). Die ersten Auswirkungen der Verdichtung sind bereits nach einer Woche erkennbar (COÛTEAUX 1985b). Von 4 untersuchten Arten waren die Individuen von *Trinema complanatum* in der am stärksten verdichteten Probe (50%) signifikant kleiner als in der Kontrollprobe (BERGER et al. 1985). Alle diese Veränderungen sind offensichtlich primär auf das reduzierte Porenvolumen zurückzuführen, worauf die relative Förderung der kleinen Arten hinweist.

Diese Untersuchungen machen deutlich, daß bereits geringe Bodenverdichtungen zu einer deutlichen Minderung der standing crop und Produktion der Protozoen führen.

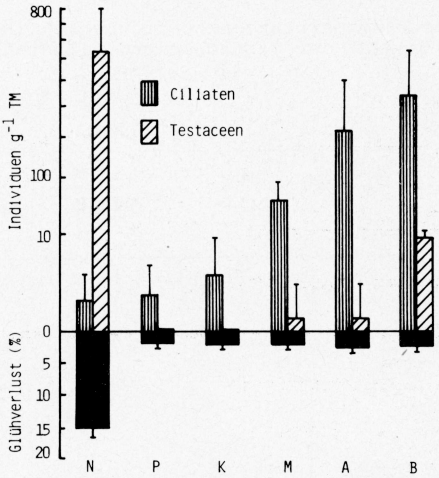

Abb. 3: Wirkung organischer (A, B) und mineralischer (M) Dünger auf die Abundanz (mit Standardabweichung) der Ciliaten und Testaceen und auf den Gehalt des Bodens an organischer Substanz in einer planierten, rekultivierten Schipiste in 2800 m Meereshöhe.
Methode: Düngung und Begrünung 1982, Untersuchung 1985; 5 Wiederholungen in 0-3/5 cm Bodentiefe; Direktzählung der Protozoen in wässriger Bodensuspension.
A = getrocknete bakterielle Biomasse (ARA-Schlamm; Biochemie Kundl/Tirol),
B = getrocknetes, granuliertes Pilzmyzel (BIOSOL; Biochemie Kundl/Tirol),
K = Kontrolle (nur Begrünung, kein Dünger), M = NPK-Dünger (Blaukorn Kompo),
N = naturbelassene alpine Rasenbraunerde neben der Planie, P = Planie ohne Dünger und ohne Begrünung. Nach LÜFTENEGGER et al. (1986a).

3.3 Düngereffekte

Eine relativ große Anzahl von Untersuchungen zeigt übereinstimmend, daß Düngung zu einer Erhöhung der Abundanz der Protozoen führt, obwohl bei den Testaceen auch Abundanzrückgänge beobachtet worden sind (FOISSNER 1987a). Damit fügen sich die Protozoen gut in das allgemeine Bild der Düngerwirkungen ein. Wichtiger und weniger genau untersucht ist die Frage, welche Dünger, organische oder mineralische 'Kunstdünger', am stärksten wirken. Wir hatten im Rahmen einer Projektstudie die Gelegenheit, diese Frage näher zu untersuchen (LÜFTENEGGER et al. 1986a). Es zeigte sich, daß die organischen Dünger einen signifikant höheren Anstieg der organischen Substanz des Bodens und der Abundanz und Biomasse der Ciliaten und Nematoden bewirkten als ein mineralischer Volldünger. Die Testaceen konnten auf den planierten, begrünten Rohböden innerhalb des Versuchszeitraumes (1982-1985) keine nennenswerten Populationsdichten aufbauen (Abb. 3). Die hohe Abundanz aktiver Ciliaten, die allerdings für alpine Böden untypisch ist, weist darauf hin, daß besonders die organisch gedüngten Flächen gute

Voraussetzungen für eine Wiederbesiedlung durch autochthone Tier- und Pflanzenarten und für eine fortschreitende Bodenbildung besitzen.

Bei den Mineraldüngern scheinen langsam lösliche (z.B. Thomasphosphat) eine stärkere Förderung der Protozoen zu bewirken als schnell lösliche NPK-Volldünger (BERGER et al. 1986). Die Frage bedarf aber noch genauerer Untersuchung.

3.4 Biozide

Die mit den Agrochemikalien verbundenen Probleme werden oft einseitig vom mikrobiologischen oder vom Gesichtspunkt der höheren Tiere aus gesehen. Aber auch die Bodenprotozoen werden von Bioziden beeinflußt. FOISSNER (1987a) folgert aus den bisher dazu vorliegenden Untersuchungen:

I. Bodenprotozoen reagieren auf Biozide sehr ähnlich wie andere Organismen.
II. Viele Protozoenarten sind gegen Biozide genauso empfindlich wie andere, häufiger verwendete Testorganismen.
III. Insektizide sind für Bodenprotozoen toxischer als Herbizide.
IV. Alle bisher untersuchten Insektizide führen bei Anwendung der 60-Tage-'Regel' von DOMSCH et al. (1983) zu einer kritischen Depression der Protozoenpopulationen, während Herbizide tolerierbare Effekte zeigen. Dies wird allerdings durch neuere Untersuchungen von PIŽL (1985) eingeschränkt, der feststellte, daß Zeazin 50 zu einem stark erhöhten Befall der Regenwürmer mit monocystiden Gregarinen führt (Tab. 2).

Tab. 2: Wirkung des Herbizides Zeazin 50 auf den Befall von Regenwürmern mit monocystiden Gregarinen.
Nach PIŽL (1985).

Spezies	Kontrolle ohne Cysten	Kontrolle mit Cysten	5 kg/ha	40 kg/ha
Lumbricus castaneus	0	64.0	83.3**	100.0**
Octolasium lacteum	0	36.0	52.0*	75.0*
Lumbricus terrestris	0	56.0	84.0**	96.0**

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ von der Kontrolle mit Cysten (χ^2-Test).
Angaben in "relative Frequenz der Infektion" (%).

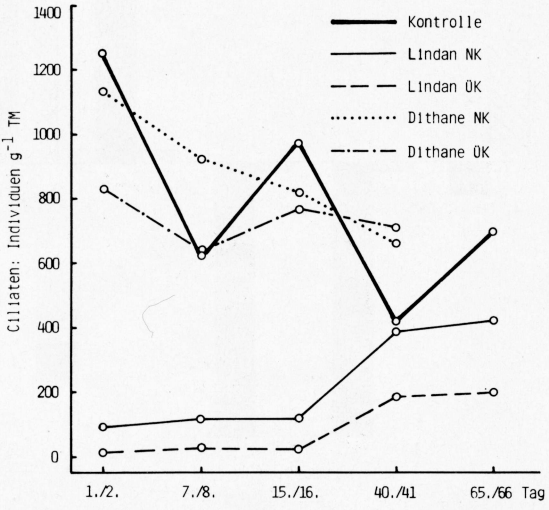

Abb. 4: Wirkung von Lindan (Insektizid) und Dithane (Fungizid; Wirkstoff Mancozeb) auf die Ciliaten der Streuschicht (0-3 cm) eines Fichtenwaldes.
Methode: randomisiertes Block-Design, n = 6; Direktzählung der Ciliaten in wässriger Bodensuspension. NK = Normalkonzentration (= empfohlene Aufwandmenge), TM = Trockenmasse des Bodens, ÜK = 10fache empfohlene Aufwandmenge (PETZ, FOISSNER unpubl.).

Die Studien, aus denen diese Verallgemeinerungen abgeleitet wurden, sind anfechtbar, weil das experimentelle Design nicht immer einwandfrei war und die Abundanzwerte auf den recht unsicheren Kulturmethoden basieren. Ersteres gilt leider auch für die neue Arbeit von LAMINGER u. MASCHLER (1986), die aber zumindest zeigt, daß die Testaceen ähnlich empfindlich reagieren wie die Ciliaten in unseren Versuchen. Daher haben wir ein sorgfältig kontrolliertes Freilandexperiment (randomisierte Blockanlage mit 6 Wiederholungen) mit je einem Insektizid und Fungizid aufgebaut. Die Auswertung ist noch im Gange, die ersten Ergebnisse bestätigen aber die oben angeführten Folgerungen (Abb. 4). Wir halten diese Resultate für sehr wichtig, da sie es vielleicht ermöglichen, ein relativ billiges und vor allem sehr rasch und genau arbeitendes Screeningsystem für Pestizide aufzubauen.

3.5 Ökologischer und konventioneller Landbau

Zu dieser heute heftig diskutierten Frage liegen hinsichtlich der Protozoen erste Ergebnisse von FOISSNER (1987b) und FOISSNER et al. (1987) vor. Weitere Untersuchungen sind im Gange. Auch andere Tiergruppen sind wenig bearbeitet, was einmal mehr beweist, daß Schlagworte wie 'toter Boden' oft keinen oder einen nur wenig abgesicherten wissenschaftlichen Hintergrund besitzen. Die Graphik (Abb. 5) zeigt einen deutlichen Trend, daß in den ökologisch bewirtschafteten Böden mehr Protozoen vorhanden sind als in den konventionell bearbeiteten. Da die Daten auf nur 4 Probenahmen basieren, ist eine saubere statistische Verarbeitung noch nicht möglich; immerhin deuten alle drei signifikanten Differenzen und die Mehrzahl der Mittel-

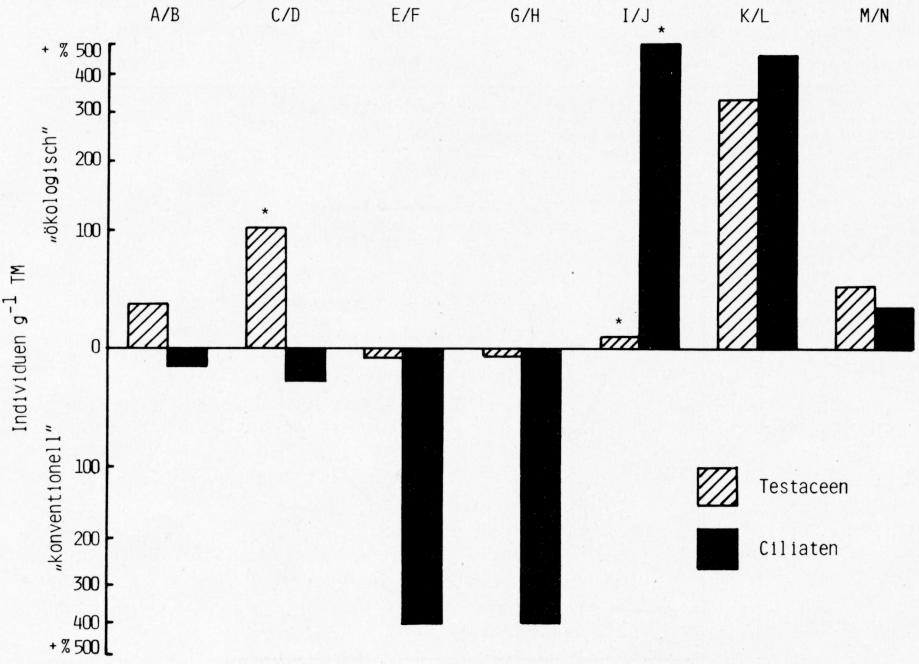

Abb. 5: Vergleich der Abundanz der Testaceen und Ciliaten in 7 ökologisch und konventionell bewirtschafteten Wiesen (A/B, E/F, I/J) und Äckern (C/D, G/H, K/L, M/N).
Methode: Mittelwerte aus je 4 Untersuchungen im Verlaufe eines Jahres; Testaceen: Direktzählung in wässriger Bodensuspension; Ciliaten: Kulturmethode. TM = Trockenmasse des Bodens, * $P \leq 0.10$ (Zweiwegvarianzanalyse). Nach Daten von FOISSNER (1987b) und FOISSNER et al. (1987).

werte in die oben angeführte Richtung. Die bodenkundlichen Analysen (FOISSNER 1987b, FOISSNER et al. 1987) und die in 3.1 - 3.4 angeführten Befunde weisen darauf hin, daß die im Durchschnitt etwas höhere Abundanz der Protozoen in den ökologisch bewirtschafteten Flächen durch die bessere Humuswirtschaft und den Verzicht auf rasch lösliche Mineraldünger und Pestizide verursacht sein könnte. Auffallende Unterschiede im Artenspektrum oder in der Artenzahl wurden bisher nicht gefunden.

Mit dankenswerter finanzieller Unterstützung des Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, Projekte Nr. 5226 und Nr. 5889.

Literatur

BERGER H., FOISSNER W., ADAM H., 1985: Protozoologische Untersuchungen an Almböden im Gasteiner Tal (Zentralalpen, Österreich). IV. Experimentelle Studien zur Wirkung der Bodenverdichtung auf die Struktur der Testaceen- und Ciliatentaxozönose. Veröff. Öst. MaB-Progr. 9: 97-112.

BERGER H., FOISSNER W., ADAM H., 1986: Field experiments on the effects of fertilizers and lime on the soil microfauna of an alpine pasture. Pedobiologia 29: 261-272.

BUITKAMP U., 1979: Vergleichende Untersuchungen zur Temperaturadaptation von Bodenciliaten aus klimatisch verschiedenen Regionen. Pedobiologia 19: 221-236.

COÛTEAUX M.-M., 1985a: Relation entre la densité apparente d'un humus et l'aptitude à la croissance de ses ciliés. Pedobiologia 28: 289-303.

COÛTEAUX M.-M., 1985b: The effects of compressing forest litter (H layer) on the populations of testate amoebae. Revue Écol. Biol. Sol 22: 447-461.

CLARHOLM M., 1985: Interactions of bacteria, protozoa and plants leading to mineralization of soil nitrogen. Soil Biol. Biochem. 17: 181-187.

DOMSCH K.H., JAGNOW G., ANDERSON T.-H., 1983: An ecological concept for the assessment of side-effects of agrochemicals on soil microorganisms. Residue Rev. 86: 65-105.

FOISSNER W., FRANZ H., ADAM H., 1982: Terrestrische Protozoen als Bioindikatoren im Boden einer planierten Ski-Piste. Pedobiologia 24: 45-56.

FOISSNER W., 1985: Protozoologische Untersuchungen an Almböden im Gasteiner Tal (Zentralalpen, Österreich). III. Struktur und Dynamik der Testaceen- und Ciliatentaxozönose. Veröff. Öst. MaB-Progr. 9: 65-95.

FOISSNER W., 1987a: Soil protozoa: fundamental problems, ecological significance, adaptations in ciliates and testaceans, bioindicators and guide to the literature. Progr. Protistology 2: 69-212.

FOISSNER W., 1987b: The micro-edaphon in ecofarmed and conventionally farmed dryland cornfields near Vienna (Austria). Biol. Fert. Soils 3: 45-49.

FOISSNER W., FRANZ H., ADAM H., 1987: Untersuchungen über das Bodenleben in ökologisch und konventionell bewirtschafteten Acker- und Grünlandböden im Raum Salzburg. Verh. Ges. Ökol. 15: 333-339.

LAMINGER H., MASCHLER O., 1986: Auswirkungen von einigen Bioziden auf die Bodenprotozoen im Raum Vill (Tirol/Österreich). Zool. Anz. 216: 109-122.

LÜFTENEGGER G., FOISSNER W., ADAM H., 1986a: Der Einfluß organischer und mineralischer Dünger auf die Bodenfauna einer planierten, begrünten Schipiste oberhalb der Waldgrenze. Z. Vegetationst. 9: 149-153.

LÜFTENEGGER G., FOISSNER W., BERGER H., ADAM H., 1986b: Ciliatostasis and its disruption by human influences. J. Protozool. Abstr. 139.

MEISTERFELD R., 1986: The importance of protozoa in a beech forest ecosystem. Adv. Protozool. Res.:(in press).

PETZ W., FOISSNER W., WIRNSBERGER E., KRAUTGARTNER W.D., ADAM H., 1986: Mycophagy, a new feeding strategy in autochthonous soil ciliates. Naturwiss. 73:560-561.

PIŽL V., 1985: The effect of the herbicide Zeazin 50 on the earthworm infection by monocystid gregarines. Pedobiologia 28: 399-402.

RAIKOV I.B., 1982: The protozoan nucleus. Morphology and evolution. Cell Biol. Monogr. 9: 1-474.

SLÁDEČEK V., 1973: System of water quality from the biological point of view. Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol. 7: 1-218.

STOUT J.D., HEAL O.W., 1967: Protozoa. In: (Ed. BURGES A., RAW F.): Soil Biology. New York (Academic Press): 149-195.

Adresse:

Prof. Dr. Wilhelm Foissner
Institut f. Zoologie Univ.
Hellbrunnerstr. 34

A-5020 Salzburg